

Análisis de los generadores de hidrógeno in-situ para motores de combustión interna

Analysis of on-site hydrogen generators

Jorge E. Eterovic⁽¹⁾, Gabriel E. Blanco⁽²⁾, Luis E. Fauroux⁽³⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas,
Universidad Nacional de La Matanza
eterovic@unlam.edu.ar

⁽²⁾Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas,
Universidad Nacional de La Matanza

⁽³⁾Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas,
Universidad Nacional de La Matanza

Resumen:

Los kits de generación de hidrógeno para motores de combustión interna representan una alternativa tecnológica emergente para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes. Estos sistemas, conocidos como generadores de oxihidrógeno (HHO), funcionan mediante electrólisis, descomponiendo agua en hidrógeno y oxígeno, los cuales se introducen en la cámara de combustión del motor para optimizar la mezcla aire-combustible. En motores de hasta 4 litros de cilindrada, los kits disponibles en el mercado prometen mejoras en el rendimiento del motor, reducción del consumo de combustible de hasta un 35%, y disminución significativa de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), gases derivados de nitrógeno (NO_x) y otros contaminantes. Se indica que contribuyen a la limpieza interna del motor y prolongan la vida útil del aceite lubricante. Se realizarán los ensayos, validaciones y chequeo de resultados respecto a la reducción de emisiones, mejora de eficiencia, etc.

Abstract:

Hydrogen generation kits for internal combustion engines represent an emerging technological alternative for improving energy efficiency and reducing pollutant emissions. These systems, known as oxyhydrogen (HHO) generators, operate through electrolysis, breaking down water into hydrogen and oxygen, which are then introduced into the engine's combustion chamber to optimize the air-fuel mixture. For engines up to 4 liters in displacement, the kits available on the market promise improvements in engine performance, fuel consumption reductions of up to 35%, and a significant decrease in emissions of carbon dioxide (CO₂), nitrogen oxides (NO_x), and other pollutants. They are also said to contribute to internal engine cleaning and extend the life of the lubricating oil. Tests, validations, and verification of results regarding emissions reduction, efficiency improvement, etc., will be carried out.

Palabras Clave: *Combustible, Hidrógeno, Motores de combustión interna, Emisiones*

Key Words: *Fuel, Hydrogen, Internal combustion engines, Emissions*

I. CONTEXTO

La búsqueda de soluciones tecnológicas que permitan reducir el impacto ambiental de los sistemas de transporte ha cobrado especial relevancia en las últimas décadas. En este contexto, los motores de combustión interna (MCI), ampliamente utilizados en vehículos livianos y medianos, han sido objeto de múltiples investigaciones orientadas a mejorar su eficiencia energética y disminuir sus emisiones contaminantes. Una de las alternativas que ha ganado terreno es la incorporación de sistemas auxiliares de generación de hidrógeno, comúnmente conocidos como kits HHO, que permiten enriquecer la mezcla de aire-combustible con hidrógeno y oxígeno obtenidos por electrólisis del agua.

II. INTRODUCCIÓN

Los kits de generación de hidrógeno se presentan como una solución de bajo costo y fácil implementación, especialmente atractiva para motores de hasta 4 litros de cilindrada, que representan una fracción significativa del parque automotor en países como Argentina. La tecnología oxihidrógeno (HHO) no reemplaza el combustible fósil, sino que lo complementa, mejorando la eficiencia de la combustión y reduciendo la cantidad de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y dióxido de carbono (CO₂) emitidos al ambiente. Además, se ha reportado una mejora en el rendimiento del motor, una disminución en el consumo de combustible y una prolongación de la vida útil del aceite lubricante, lo que contribuye a la sostenibilidad del sistema mecánico [1].

Desde el punto de vista termodinámico, la adición de hidrógeno a la mezcla de combustión modifica las características de la llama, aumentando la velocidad de propagación y mejorando la eficiencia volumétrica del motor. Esto se traduce en una combustión más completa, con menor residuo térmico y mayor aprovechamiento de la energía contenida en el combustible. Sin embargo, la implementación de estos sistemas requiere un análisis detallado de los parámetros operativos, la compatibilidad con los sistemas de gestión electrónica del motor, y la seguridad en la manipulación del gas generado [2].

Los kits HHO están compuestos por una celda electrolítica (generalmente del tipo celda seca), un depósito de agua con electrolito, un burbujeador para eliminar impurezas, una caja de control que regula el voltaje y la corriente aplicada y un sistema de conexión al múltiple de admisión del motor (Figura 1).



Figura 1. Kit HHO

La instalación puede realizarse sin modificaciones estructurales en el motor, lo que facilita su adopción en vehículos existentes. No obstante, la eficiencia del sistema depende de múltiples factores, como la calidad de los materiales, el diseño de la celda, la concentración del electrolito, la temperatura de operación y el régimen de carga del motor [3] (Figura 2).

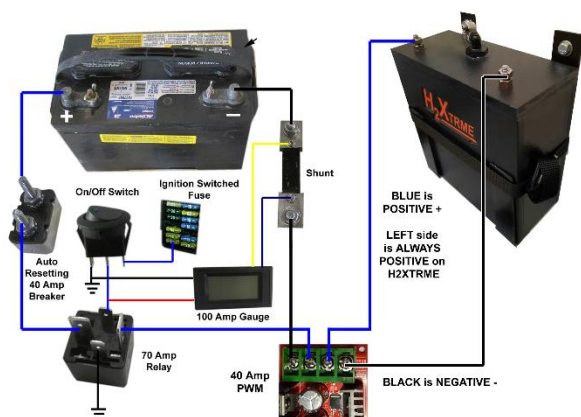


Figura 2. Instalación del Kit HHO

En el ámbito académico, el estudio de estos kits permite abordar múltiples disciplinas de la ingeniería mecánica, incluyendo la termodinámica aplicada, la transferencia de calor, la dinámica de fluidos, la electrónica de potencia y la ingeniería ambiental. Además, abre la puerta a proyectos de investigación y desarrollo orientados a la mejora de los sistemas existentes, la evaluación de su impacto en motores de distintas configuraciones y la validación experimental de los beneficios reportados por fabricantes y usuarios.

La presente investigación se centra en el análisis técnico de los kits de generación de hidrógeno aplicables a motores de combustión interna de hasta 4 litros de

cilindrada. Se busca consolidar el conocimiento disponible, identificar las variables críticas que afectan el desempeño del sistema y establecer una base metodológica para su evaluación en condiciones reales de operación. Para ello, se abordarán los fundamentos teóricos del proceso de electrólisis, las características del hidrógeno como combustible auxiliar, la interacción con los ciclos termodinámicos del motor y los aspectos prácticos de instalación y operación.

Asimismo, se analizarán los resultados obtenidos en pruebas de campo y laboratorio, considerando parámetros como consumo específico de combustible, emisiones gaseosas, temperatura de escape, presión en cámara de combustión y comportamiento del sistema de lubricación. Se prestará especial atención a la compatibilidad con motores modernos equipados con sistemas de inyección electrónica, sensores de oxígeno, catalizadores y unidades de control electrónico (ECU), dado que la incorporación de hidrógeno puede alterar las señales de retroalimentación y afectar la estrategia de inyección.

En términos de sostenibilidad, los kits HHO representan una alternativa interesante para reducir la huella de carbono del transporte sin requerir una transformación radical de la infraestructura existente. Si bien no constituyen una solución definitiva, pueden ser considerados como una tecnología de transición hacia sistemas más limpios, como los vehículos eléctricos o los motores de hidrógeno puro. Su bajo costo, facilidad de instalación y potencial de mejora en la eficiencia energética los convierten en una opción viable para flotas

de transporte urbano, vehículos particulares y aplicaciones agrícolas.

Finalmente, se discutirán las limitaciones técnicas, normativas y comerciales que enfrenta esta tecnología, así como las oportunidades de mejora mediante el desarrollo de materiales avanzados, sistemas de control inteligente, y estrategias de integración con otras tecnologías de eficiencia energética. El objetivo es proporcionar una visión integral que permita a estudiantes, investigadores y profesionales de la ingeniería mecánica comprender el potencial y los desafíos de los kits HHO en motores de combustión interna de hasta 4 litros de cilindrada.

III. MARCO TEORICO

El uso de hidrógeno como complemento en motores de combustión interna ha sido objeto de estudio desde hace décadas, pero ha cobrado mayor relevancia en el contexto actual de transición energética y reducción de emisiones contaminantes. Para comprender el funcionamiento y los beneficios de los kits de generación de hidrógeno (HHO), es necesario abordar los fundamentos científicos y técnicos que sustentan esta tecnología.

• Principios de la electrólisis:

La electrólisis del agua es el proceso mediante el cual se descompone la molécula de agua (H_2O) en sus elementos constituyentes: hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). Este proceso requiere una fuente de energía eléctrica, que se aplica a través de electrodos sumergidos en una solución electrolítica. El hidrógeno se libera en el cátodo y el oxígeno en el ánodo. La eficiencia del proceso depende de

factores como la composición del electrolito, la geometría de la celda, la temperatura, la presión y la densidad de corriente.

En los kits HHO, se utiliza una celda electrolítica que puede ser de tipo húmedo o seco. Las celdas secas son más eficientes y seguras, ya que separan físicamente el electrolito del gas producido, reduciendo el riesgo de retroceso de llama. El electrolito más común es el hidróxido de potasio (KOH), debido a su alta conductividad y estabilidad química, otra posibilidad es el Hidróxido de sodio (NaOH). Paneles o placas fotovoltaicas: Conjunto de celdas conectadas en serie o paralelo para generar electricidad en corriente continua (CC) [4].

• Propiedades del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más ligero y abundante del universo, tiene una densidad energética por masa muy alta (120 MJ/kg), pero una densidad volumétrica baja, lo que dificulta su almacenamiento. En estado gaseoso, es altamente inflamable y tiene una velocidad de difusión elevada, lo que facilita su mezcla con el aire. Su temperatura de ignición es de aproximadamente 585 °C, y su rango de inflamabilidad en aire va del 4% al 75%.

Estas propiedades hacen del hidrógeno un excelente catalizador para la combustión de hidrocarburos. Al introducir pequeñas cantidades de H_2 en la cámara de combustión, se mejora la propagación de la llama, se reduce el tiempo de combustión y se favorece una oxidación más completa del combustible [3].

• Ciclos termodinámicos en motores

Los motores de combustión interna operan bajo los principios de los ciclos Otto (gasolina) y diésel. En ambos casos, la eficiencia térmica está limitada por la relación de compresión, las pérdidas por calor y la calidad de la combustión. La adición de hidrógeno permite mejorar la eficiencia del ciclo al reducir las pérdidas por combustión incompleta y aumentar la temperatura de llama sin necesidad de modificar la relación de compresión.

Estudios experimentales han demostrado que la adición de HHO puede reducir el consumo de combustible entre un 10% y un 35%, dependiendo del tipo de motor, las condiciones de operación y la calidad del kit instalado [4].

• Emisiones contaminantes

La combustión de hidrocarburos genera una serie de contaminantes, entre los que se destacan el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx), los hidrocarburos no quemados (HC) y las partículas sólidas (PM). El uso de hidrógeno como aditivo permite reducir significativamente estas emisiones, al favorecer una combustión más completa y limpia.

El hidrógeno no contiene carbono, por lo que su combustión no genera CO₂. Además, al mejorar la eficiencia de la combustión, se reduce la formación de NOx, que se produce a altas temperaturas en presencia de oxígeno y nitrógeno.

• Componentes de un kit HHO

Un kit típico de generación de hidrógeno para motores de hasta 4 litros incluye:

- Celda electrolítica: donde se produce el gas HHO.
- Depósito de agua destilada: alimenta la celda.
- Electrolito: generalmente KOH o NaOH.
- Burbujeador: filtra impurezas y evita retroceso de llama.
- Controlador PWM: regula la corriente eléctrica.
- Relés y fusibles: protegen el sistema eléctrico.
- Sensores: monitorean temperatura, presión y nivel de agua.
- Conexiones eléctricas y mangueras: para integrar el sistema al motor.

• Seguridad y normativas

El manejo de hidrógeno requiere precauciones especiales debido a su alta inflamabilidad. Los kits deben incorporar sistemas de seguridad como válvulas de alivio, sensores de temperatura, cortacircuitos y dispositivos antirretroceso. Aunque no existe una normativa específica para kits HHO en muchos países, se recomienda seguir estándares internacionales como la norma ISO 16110 para sistemas de generación de hidrógeno.

• Evaluación energética

Desde el punto de vista energético, el sistema HHO no busca generar energía adicional, sino mejorar la eficiencia de la combustión existente. La energía eléctrica utilizada para la electrólisis proviene del alternador del vehículo, que a su vez consume potencia del motor.

De verificarse un efectivo ahorro de combustible en el motor de combustión, con el uso del dispositivo, esto implica que el balance energético de la incorporación al

sistema del dispositivo fue positivo y de una magnitud tal que permite cubrir el mayor consumo eléctrico de la electrólisis y generar un ahorro efectivo de combustible. Diversos estudios han demostrado que, en condiciones óptimas, se justifica el uso del dispositivo. Sin embargo, la eficiencia depende de la calidad del diseño, la instalación y el mantenimiento del kit.

IV. METODOLOGIA

Se consideran kits comerciales disponibles en Argentina y otros países, con especificaciones técnicas compatibles con motores de 4 cilindros y hasta 4 litros de cilindrada. Se documentan las características de cada componente, incluyendo dimensiones, materiales, capacidad de producción de gas (litros por minuto), consumo eléctrico, voltaje de operación y compatibilidad con sistemas de encendido electrónico.

a) **Preparación del motor de prueba**

Se selecciona un motor de combustión interna de 4 cilindros, con una cilindrada de 2.0 a 4.0 litros, en buen estado de funcionamiento y sin modificaciones previas. El motor se instala en un banco de pruebas con dinamómetro, sensores de temperatura de escape, presión de admisión, consumo de combustible, emisiones de gases y velocidad de rotación.

Se realiza una inspección técnica del motor antes de la instalación del kit, registrando parámetros base como consumo específico de combustible, potencia efectiva, emisiones de CO, CO₂, NO_x y HC, temperatura de escape y eficiencia volumétrica [5], [6].

b) **Instalación del sistema HHO**

La instalación del kit se realizará siguiendo las instrucciones del fabricante, con especial atención a la ubicación de la celda, el burbujeador y las conexiones eléctricas. El sistema se conecta al alternador del vehículo o a una fuente de alimentación externa regulada. Se instala el burbujeador entre la celda y la entrada de admisión del motor, para evitar el retroceso de llama.

El controlador PWM se calibra para regular la corriente de entrada a la celda, ajustando la producción de gas según la carga del motor. Se instalan sensores de temperatura en la celda y el burbujeador, así como un sensor de nivel de agua en el depósito. Se verifica la estanqueidad del sistema y se realiza una prueba de funcionamiento en vacío [1].

c) **Ensayos de funcionamiento**

Se realizarán ensayos en tres etapas:

- Etapa 1: Motor sin HHO. Se registran todos los parámetros de funcionamiento del motor en condiciones normales, sin adición de hidrógeno. Se establecen curvas de consumo, potencia y emisiones en función de la carga y la velocidad.
- Etapa 2: Motor con HHO activado. Se activa el sistema HHO y se repiten los ensayos bajo las mismas condiciones. Se mide la producción de gas, el consumo eléctrico del sistema, la variación en el consumo de combustible, la potencia generada y las emisiones.
- Etapa 3: Comparación y análisis. Se comparan los resultados obtenidos en ambas etapas, evaluando el

impacto del HHO en la eficiencia del motor, la reducción de emisiones y el ahorro de combustible. de válvulas de alivio, fusibles, relés, sensores de corte térmico y procedimientos de mantenimiento.

Los ensayos se realizan en ciclos de carga constante, carga variable y aceleración progresiva, para simular condiciones reales de conducción. Se documentan los datos en hojas de cálculo y se grafican las curvas de comportamiento.

V. VALIDACION DE RESULTADOS

Para validar los resultados, se repiten los ensayos en diferentes motores de características similares, incluyendo motores de gasolina y diésel. Se analiza la reproducibilidad de los datos y se aplican métodos estadísticos para determinar la significancia de las variaciones observadas.

Se realizará un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de variables como la concentración del electrolito, la temperatura de operación, la calidad del agua utilizada y la calibración del controlador PWM. Se identifican los rangos óptimos de operación del sistema HHO.

Se evaluarán los riesgos asociados al uso de hidrógeno en el sistema, incluyendo fugas, sobrepresión, sobrecalentamiento y retroceso de llama. Se verifica el funcionamiento de los dispositivos de seguridad instalados y se simulan escenarios de falla para determinar la respuesta del sistema.

Se documentarán las medidas de seguridad recomendadas para la instalación y operación del kit, incluyendo el uso

a) Evaluación de seguridad:

Se evalúan los riesgos asociados al uso de hidrógeno en el sistema, incluyendo fugas, sobrepresión, sobrecalentamiento y retroceso de llama. Se verifica el funcionamiento de los dispositivos de seguridad instalados y se simulan escenarios de falla para determinar la respuesta del sistema.

Se documentan las medidas de seguridad recomendadas para la instalación y operación del kit, incluyendo el uso de válvulas de alivio, fusibles, relés, sensores de corte térmico y procedimientos de mantenimiento.

b) Análisis Económico

Se realiza un análisis de costo-beneficio considerando el precio del kit, el costo de instalación, el ahorro estimado de combustible, la vida útil del sistema y el mantenimiento requerido. Se calcula el tiempo de amortización del kit en función del uso promedio del vehículo.

Se comparan los costos operativos del motor con y sin HHO, incluyendo el consumo de agua destilada, electrolito, energía eléctrica y mantenimiento del sistema. Se evalúa la viabilidad económica del sistema para usuarios particulares y flotas comerciales.

c) Documentación y presentación

Todos los datos obtenidos se consolidan en un informe técnico que incluye gráficos, tablas, fotografías de la instalación, esquemas del sistema y análisis detallado de los resultados. El informe se presenta en formato académico, con estructura de artículo científico, y se somete a revisión por pares en el ámbito universitario.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. F. Cando Piarpuean and H. R. Quelal Mnosalvas, *Construcción y adaptación de un sistema generador de gas de hidrógeno para suministrarlo a un motor de combustión interna*. Universidad Técnica del Norte, 2012.
- [2] Á. Dias Rey, E. González Gil, and A. González Estrada, “Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 17, pp. 143–154, 2018.
- [3] C. Ji and S. Wang, “Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 18, pp. 7823–7834, 2009.
- [4] S. Wang, C. Ji, J. Zhang, and B. Zhang, “Comparison of the performance of a spark-ignited gasoline engine blended with hydrogen and hydrogen–oxygen mixtures,” *Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 5832–5837, 2011.
- [5] A. C. Yilmaz, E. Uludamar, and K. Aydin, “Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11366–11372, 2010.
- [6] S. A. Musmar and A. A. Al-Rousan, “Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines,” *Fuel*, vol. 90, no. 10, pp. 3066–3070, 2011.

Recibido: 2025-02-20

Aprobado: 2025-12- 1

Hipervínculo Permanente: <https://doi.org/10.54789/reddi.10.2.5>

Datos de edición: Vol. 10 - Nro. 2 - Art. 5

Fecha de edición: 2025-12-30

